



5G-ACIA白皮书

工业5G用例 商业价值与投资回报评估方法

5G工业与自动化联盟

1 执行摘要

虽然5G技术本身以及基于5G的工业应用的成熟度都在稳步提升，但通过部署5G而产生的技术和经济附加值仍具有不确定性。因此，制造业客户对该技术的使用仍持观望和犹豫的态度。

针对这一挑战，本白皮书提出了一种工业5G用例商业价值的评估方法。该方法包含一系列的技术经济目标，这些目标需通过应用5G技术来实现。每个目标的达成率，将通过计算特定的关键绩效指标（KPI）方程式来进行量化评估。对于关键绩效指标（KPI）方程式中的每一个参数，我们都会考量5G技术的应用对其产生的预估影响，从而可以量化测算5G对该项KPI的整体作用效果。该方法的核心原则在于，必须将5G技术在具体应用场景中能为用户带来的实际收益作为评估基础。采用估算值使该方法体系能够广泛应用于各种不同的工业5G用例，从而可以基于估算对5G在制造环境中的商业价值提出假设。

本白皮书中，我们将通过三个典型用例来演示该方法的核心原理。首个用例聚焦内部物流场景，通过部署自动导引车（AGV）实现物料转运自动化。第二个用例针对铣削加工过程，借助5G技术增强其在线控制能力。第三个用例由某汽车主机厂（OEM）提供，重点是在汽车制造厂中实现自主代客泊车解决方案。针对每个用例，均通过5G技术来解决现有业务痛点，并利用所述方法量化评估5G技术可带来的潜在效益。

关于5G工业与自动化联盟

5G工业与自动化联盟（5G-ACIA）成立的目的，是致力于成为解决、讨论和评估工业领域5G技术相关技术、法规及商业议题的全球性核心平台。联盟汇聚了整个生态系统及其所有相关利益方，成员包括但不限于运营技术（OT）行业（工业自动化公司、工程公司、生产系统制造商、终端用户等）、信息与通信技术（ICT）行业（芯片制造商、网络基础设施供应商、移动网络运营商等），以及大学、政府机构、研究机构和行业协会等。5G-ACIA的总体目标是推动工业5G的最佳应用，最大化5G技术及5G网络在工业领域的价值。同时确保正在进行的5G标准化与监管工作能够充分考虑工业界的相关利益和需求，并将5G的新进展有效传达给制造商并被其理解。

2 目录

1	执行摘要	2
3	引言与动机	4
4	关于评估模型的描述	5
5	示例计算	10
5.1	AGV用例	10
5.2	铣削加工用例	15
5.3	汽车生产用例	18
5.4	中期结论	18
6	总结与展望	18
7	缩略语	18
8	参考文献	18
9	5G-ACIA会员一览	22

3 引言与动机

虽然许多制造企业认识到无线通信技术的价值，但5G在工业领域的应用普及率仍相对较低。Bitkom的一项研究显示，超过半数的受访企业认为“缺乏关于经济效益的明确预期”是他们不愿采用该技术的关键原因[1]。本白皮书的编写正是为了应对这一挑战。其核心目标在于提出一套实用的评估方法，用于衡量在生产环境中部署5G用例所能产生的商业价值。本白皮书借鉴了5G-ACIA合作伙伴开展的多项研究成果，如[2]、[3]和[4]所述。

这套评估方法的核心设计原则，是在精确性与普适性之间取得平衡。虽然现有的一些方法可以量化5G用例在特定领域的商业价值，但其主要局限在于过度聚焦单一场景。这类“一事一议”的评估方式虽能实现精准分析，却缺乏可移植性。鉴于企业通常需评估多样化的用例，这种可移植性的缺乏将限制5G技术在工业界的广泛使用。因此，本白皮书提出的评估方法采用基于估算的评估思路，以衡量在制造环境中部署5G用例可实现的效益。

这套评估方法的另一项核心原则是以终端用户为中心。由于方案旨在推动5G在工业场景的规模化落地，终端用户的实际价值获得感成为关键衡量标准。

本白皮书的结构安排如下：首先详细阐述所构建的评估模型及其方法论基础，其次通过示例演示该方法的具体应用，最后对评估结果进行批判和反思并提出后续优化方向。

4 关于评估模型的描述

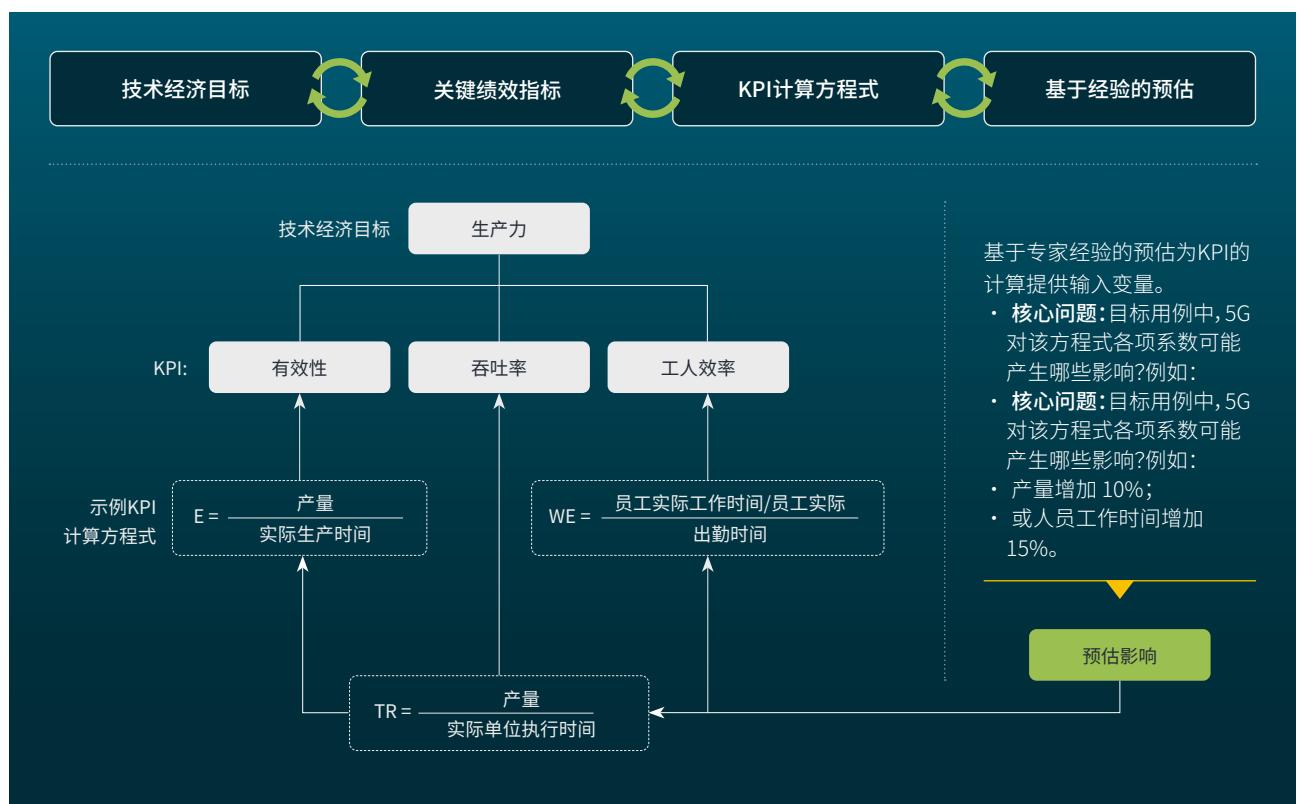
此评估模型的核心目标是创建一套有效的计算方法，帮助相关企业量化评估工业5G用例可实现的商业价值。评估必须从终端用户视角出发，因为终端用户是最终在生产环境中部署该技术的主体。评估以技术经济目标为主要参考依据，其核心指导问题是：“5G的应用对终端用户所追求的技术经济目标可能产生哪些潜在影响？”图1以“生产力”这一技术目标为例，展示了这套评估模型的基本原理。

该评估模型遵循渐进式的设计方法，表1对其关键流程进行了总结，图1展示了模型基本原理。在初始化阶段，需对所评估的用例进行技术描述，详细说明在生产环境中执行该用例所采用的操作流程与评估场景。

要评估工业5G用例的商业价值并计算投资回报，必须将5G方案与竞争性技术（如4G/LTE-A等传统技术）或人工实施方案进行比对。为此，需要分别为基于竞争性技术的实施方案和基于5G的实现方式确定关键绩效指标，并考量5G的技术优势及其对各KPI的具体影响，从而量化5G相较于竞争技术的整体效益。

例如，在评估AGV用例的准时交付率(OTD)这一KPI时，需估算5G如何影响OTD计算方程式的分子（按时交付的客户订单数）和分母（总客户订单数）。由于5G能够支持海量设备并发接入网络，可以推断，通信参与节点的整体增加将带来更多按时交付的客户订单，这在此场景中是通过提升内部物流效率实现的。

图1：评估模型的基本原理



来源：5G-ACIA / ZVEI e.V.

表1: 模型使用的步骤方法总结

步骤编号/名称	释义
步骤1-应用规格说明	对所评估的具体应用进行技术场景描述
步骤2-5G业务目标设定	明确通过部署该应用计划达成的具体技术经济目标
步骤3-KPI估算与合成	通过各项指标的估算与计算, 实现对关键绩效指标 (KPI) 的综合评估。
步骤4-目标评估	计算5G技术对KPI产生的总体影响程度

来源: 5G-ACIA / ZVEI e.V.

下一步, 需选定通过该用例的实施与应用所要达成的技术经济目标。我们在前期调研阶段已识别出多项可能的技术及经济性目标, 这些目标在表2与表3中做了汇总。

表2: 基于5G的用例实施的技术目标[5],[3],[6]

技术目标	描述	关键绩效指标
灵活性	多零件共线生产能力	<ul style="list-style-type: none"> • 机器灵活性 (MF) • 设置比率 (SUR)
移动性	车间内的物件搬移能力	<ul style="list-style-type: none"> • 物料处理移动性 (MHM) • 准时交付 (OTD) • 空间生产力 (SP)
生产力	单位投入产出率(亦称生产效率)	<ul style="list-style-type: none"> • 有效性 (E) • 吞吐率 (TR) • 工人效率 (WE)
质量	产出达标率	<ul style="list-style-type: none"> • 一次通过率 (FPY) • 质量比率 (QR) • 反工比率 (RR) • 废品比率 (SR)
安全	系统安全保障能力	<ul style="list-style-type: none"> • 事故比率 (AR) • 平均故障间隔时间 (MTBF) • 平均修复时间 (MTTR)
可持续性	绿色制造实现水平	<ul style="list-style-type: none"> • 压缩空气消耗比率 (ACR) • 电力消耗比率 (ECR) • 燃气消耗比率 (GCR) • 水消耗比率 (WCR)
利用率	加工时间利用率	<ul style="list-style-type: none"> • 分配效率 (AE) • 可用性 (A) • 技术效率 (TE) • 利用效率 (UE)

来源: 5G-ACIA / ZVEI e.V.

表3: 工业使用5G的商业目标总结

商业目标	释义
净现值 (NPV)	指未来产生的现金流入与流出现值之间的差额。
投资回报率 (ROI)	用于衡量投资的经济效率, 即通过投资获得的收益与投资成本之间的比率。
运营支出 (OpEx)	指企业在日常运营活动中持续发生的、旨在维持当前业务正常运转的各项支出(如员工薪酬、市场营销费用、办公场地租金、水电费utilities、日常维护费用等)。
资本支出 (CapEx)	指企业为获取、升级或延长使用寿命而投入于长期资产(如厂房、机器设备、技术无形资产等)的支出。

来源: 5G-ACIA / ZVEI e.V.

在技术目标以外, 我们还设定了用以评估5G用例所能带来效益的经济目标。净现值 (NPV)、投资回报率 (ROI)、运营成本 (OpEx) 及资本性支出 (CapEx) 等几项指标将一起用于评估投资盈利能力。相关经济目标已汇总于表3。

在第三步中, 我们将进行关键绩效指标 (KPI) 的估算与计算。在选定技术经济目标后, 即可确定关联的KPI指标。如图1所示, 我们以"生产力"这一目标为例展示了典型指标选取方案。通过计算"设备综合效率"、"吞吐率"和"人员工作效率"等关联KPI, 即可量化评估“生产力”这一目标的提升程度。

针对每个KPI, 我们给出了用于具体数值测算的基础方程式。考虑精准性与普适性相平衡的原则, 本模型通过对方程各组分进行估算来实现KPI的量化评估。核心在于解答"5G的应用会对本用例方程系数产生何种程度的影响?"该问题应该由深耕该领域的专家, 基于对5G影响用例性能参数的专业判断来作答。

该问题需由深耕该领域的行业专家来解答, 他们能够针对5G如何影响决定用例整体性能的各项具体参数, 提供专业的判断。

表4汇总了预定义的技术目标、相关联的KPI及其基础计算方程式, 为基于估计的KPI计算提供完整框架。

表4: 目标、KPI及KPI计算的基础方程式

技术目标	关键绩效指标	方程式
灵活性	• 机器灵活性 (MF)	$MF = \frac{\text{产品多样性}}{\text{机器数量}}$
	• 设置比率 (SUR)	$SUR = \frac{\text{实际单位设置时间}}{\text{实际单位处理时间}}$
移动性	• 物料处理移动性 (MHM)	$MHM = \frac{\text{系统支持路径数}}{\text{总路径数}}$
	• 准时交付 (OTD)	$OTD = \frac{\text{准时客户订单}}{\text{总客户订单}}$
	• 空间生产力 (SP)	$SP = \frac{\text{生产面积} - \text{修复面积}}{\text{生产面积}}$
生产力	• 有效性 (E)	$E = \frac{\text{产量}}{\text{计划单项运行时间} * \text{实际生产时间}}$
	• 吞吐率 (TR)	$TR = \frac{\text{产量}}{\text{实际单位执行时间}}$
	• 工人效率 (WE)	$WE = \frac{\text{员工实际工作时间}}{\text{员工实际出勤时间}}$
质量	• 一次通过率 (FPY)	$FPY = \frac{\text{首次良好数量}}{\text{检查数量}}$
	• 质量率 (QR)	$QR = \frac{\text{合格产品数量}}{\text{产量}}$
	• 反工率 (RR)	$RR = \frac{\text{返工产品数量}}{\text{产量}}$
	• 废品率 (SR)	$SR = \frac{\text{废品数量}}{\text{产量}}$
安全	• 事故率 (AR)	$AR = \frac{\text{事故数量}}{\text{员工实际出勤时间}}$
	• 平均故障间隔时间 (MTBF)	$MTBF = \frac{\text{故障间隔时间}}{\text{故障影响} + 1}$
	• 平均修复时间 (MTTR)	$MTTR = \frac{\text{修复时间}}{\text{总修复次数}}$
可持续性	• 压缩空气消耗率 (ACR)	$ACR = \frac{\text{压缩空气消耗量}}{\text{产量}}$
	• 电力消耗率 (ECR)	$ECR = \frac{\text{电力消耗量}}{\text{产量}}$
	• 燃气消耗率 (GCR)	$GCR = \frac{\text{燃气消耗量}}{\text{产量}}$
	• 水消耗率 (WCR)	$WCR = \frac{\text{水消耗量}}{\text{产量}}$
利用率	• 分配效率 (AE)	$AE = \frac{\text{实际单位运行时间}}{\text{计划单位运行时间}}$
	• 可用性 (A)	$A = \frac{\text{实际生产时间}}{\text{计划单位运行时间}}$
	• 技术效率 (TE)	$TE = \frac{\text{实际生产时间APT}}{\text{APT} + \text{实际单位延迟时间}}$
	• 利用效率 (UE)	$UE = \frac{\text{实际生产时间APT}}{\text{APT} + \text{实际单位延迟时间}}$

来源: 5G-ACIA / ZVEI e.V.

PRTI: planned runtime per item

在第四步也是最终步骤中，将进行目标评估工作。具体而言，需计算并解读5G部署带来的综合成效，从而基于预估推算出应用5G技术可实现的预期价值。

在初步说明模型运行机制后，接下来将通过三个工业场景的应用实例，深入地阐述该模型的功能逻辑与操作方法。

5 示例计算

本节将通过示例计算演示评估模型的应用，以说明所述方法的适用性。此处所列数据仅供参考，旨在展示该方法体系的潜在应用场景。本章首先分析AGV用例，该用例最初是在文献[3]（第5.1章）中描述的；随后在第5.2节剖析铣削加工用例，该用例最初是在文献[4]中描述的。第三个用例则基于5G-ACIA WG5工作组与某汽车制造商在2024年第四季度的系列双边会议中的合作分析成果，将在第5.3节进行详细阐述。

步骤3: KPI估计与计算

基于选定的移动性、生产率和安全性目标，将采用表5所列关键绩效指标（KPI）及对应方程式对AGV用例进行评估。

5.1 AGV用例

步骤1: 应用规范

本次分析选取集中式AGV控制系统的实施方案，即统一通过5G网络控制在生产车间中运行的整个AGV车队。同时选择4G作为对比参照。

步骤2: 5G部署目标选择

通过5G实现AGV用例需达成的目标包括移动性、生产力和安全性的提升。移动性改善源于对AGV的更精准直接控制，使其能够导航更复杂狭窄的路径；生产力的提升则得益于通信时延降低，可实现更高的AGV运行速度与更短周期内的物料运输；安全性改进则依托5G网络可靠性增强，减少信号丢失与AGV交通中断频率。因此确定移动性、生产力和安全性为本分析的三项核心目标。

表5: 用于评估AGV用例的选定目标、KPI及其方程式

技术目标	关键绩效指标	方程式
移动性	• 物料处理移动性 (MHM)	$MHM = \frac{\text{系统支持的路径}}{\text{总路径数}}$
	• 准时交付率 (OTD)	$OTD = \frac{\text{准时客户订单}}{\text{总客户订单}}$
	• 空间生产力 (SP)	$SP = \frac{\text{生产面积} - \text{修复面积}}{\text{生产面积}}$
生产力	• 有效性 (E)	$E = \frac{\text{产量}}{\text{计划单项运行时间} * \text{实际生产时间}}$
	• 吞吐率 (TR)	$TR = \frac{\text{产量}}{\text{实际单位执行时间}}$
	• 工人效率 (WE)	$WE = \frac{\text{人员实际工作时间}}{\text{人员实际出勤时间}}$
安全性	• 事故率 (AR)	$AR = \frac{\text{事故数量}}{\text{人员实际出勤时间}}$
	• 平均故障间隔时间 (MTBF)	$MTBF = \frac{\text{故障间隔时间}}{\text{故障影响} + 1}$
	• 平均修复时间 (MTTR)	$MTTR = \frac{\text{修复时间}}{\text{总修复次数}}$

来源: 5G-ACIA / ZVEI e.V.

我们将基于估计值完成九项关键绩效指标 (KPI) 的计算。为此, 必须逐项评估表5所列方程中的分子与分母参数是否受5G技术的影响。相关假设需结合领域专家提供的实证数据与经验判断共同形成。针对AGV用例, 应访谈内部物流领域的专业人员(包括技术专家与管理层)从而获取关键洞察。

对于AGV用例, 提出以下示例性假设:

- **移动性:** 因AGV行驶速度提高及意外故障停机减少, 预计对准时交付率 (OTD) 产生积极影响。
- **生产力:** 通过提升产量, 预计对设备综合效率 (E) 与吞吐率 (TR) 产生正向作用。
- **安全:** 因5G网络相较4G具备更高的可用性与可靠性, 可降低控制信号传输的中断概率, 从而对事故率 (AR) 产生积极影响。

需要特别强调的是, 本文所述的假设仅为说明评估方法的基本原理而设定的示例, 并非适用于所有AGV应用场景。实际应用中需根据具体用例的特点进行个性化设定。

接下来需要就5G的影响提出量化假设。如上所述, 这些假设应基于领域专家提供的专业意见。为此, 内部物流专家必须评估5G的技术优势将如何具体体现在选定的关键绩效指标 (KPI) 中。为确保假设的精确性和现实性, 需将领域专家的行业知识与其在5G工业应用生产实践中的专业知识相结合。

针对所讨论的用例, 现提出以下示例性假设:

- 移动性:**预计5G技术(相较4G)将带来系统性提升。由于控制能力增强,系统支持的路径数量预计增加20%(因5G控制的AGV不受预设路径限制,路径选择灵活性更高)。需要强调的是,该增幅仅为示例性假设,实际评估需由流程专家根据领域知识判断5G特性对具体用例关键特征的积极影响。
- 在此示例中,因系统路径多样性的提升,物料处理指标(MHM)预计较4G方案提高20%;伴随着AGV行驶速度的提升,预计会同步带动准时交付率(OTD)增长10%;安全性能指标(SP)在本场景中暂未设定变化。
- 生产力:**由于物料在产线中的传输速度与灵活性提升,预计对设备综合效率(E)和吞吐率(TR)产生积极影响。这些优化将提高生产所需物料的可用性,从而使KPI提升5%。工人效率(WE)指标本例中假设不受5G影响。
- 安全性:**系统控制能力增强预计使AGV因控制问题导致的故障减少,从而对平均故障间隔时间(MTBF)产生积极影响。本例假设MTBF整体提升5%,事故率(AR)与平均修复时间(MTTR)指标暂假设保持不变。

表6: 5G与4G对AGV用例的估计影响

目标	关键绩效指标	5G vs. 4G的估计影响
移动性	· 物料处理灵活性 (MHM)	+ 20 %
	· 准时交付率 (OTD)	+ 10 %
	· 空间生产力 (SP)	无影响
生产力	· 有效性 (E)	+ 5 %
	· 吞吐率 (TR)	+ 5 %
	· 工人效率 (WE)	无影响
安全性	· 事故率 (AR)	无影响
	· 平均故障间隔时间 (MTBF)	+ 5 %
	· 平均修复时间 (MTTR)	无影响

来源: 5G-ACIA / ZVEI e.V.

在计算目标达成率时,我们通过分析各项关键绩效指标(KPI)的变化来测算5G应用产生的平均影响效果。以移动性为例,其计算公式如下:

$$\Delta \text{ 移动性} = \frac{\Delta \text{ MHM} + \Delta \text{ OTD} + \Delta \text{ SP}}{3}$$

$$\Delta \text{ 移动性} = \frac{0.2 + 0.1 + 0}{3} = 0.1$$

步骤4:目标评估

根据第3步计算结果可得:移动性预计提升10% (基于假设前提),生产力预计提高3.33%,安全性预期增长1.66%。这些估值表明如何通过所开发方法测算工业5G应用的商业价值近似值。通过设定不同的参数粒度,可定义更多KPI方程式从而提升计算精度。例如吞吐率指标中的"产量"系数可通过以下方程式表示:

$$\text{产量} = \text{生产速率} \times \text{生产时间}$$

通过分析5G对生产速率的影响,可在方程式中体现5G技术的作用。具体的,可通过额外的估算或使用更精细的方程式实现,从而研究5G对生产工艺参数的影响程度。如此,用户可逐步优化方法,通过使用更精细的方程式,使估算值更贴近实际生产,但需注意嵌套方程会增加模型复杂度。

在技术目标的基础上,可同步对经济目标进行量化。例如当物料搬运成本(内部物流)因高效运输而降低时,运营成本(OpEx)将产生积极影响。本例中5G版AGV用例将通过减少工位待料时间来降低运营成本,这种优化源自物料处理效率(MHM)和准时交付率(OTD)的提升(参见表6),从而实现在相同运营支出下生产更多产品。

5.2 铣削加工用例

步骤1:用例说明

针对本用例,我们部署了一套采用无线通信的闭环控制系统来构建反馈回路。该闭环控制系统用于监控铣削加工过程,其中工件为叶片盘(属于涡轮机械部件),由整体金属坯料铣削加工而成。为实现此目标,我们在铣削加工过程中集成安装了声发射传感器。该传感器附着在工件(叶片盘)上,用于采集铣削加工产生的超声频段信号。声学传感器与具备5G通信能力的用户设备(UE)连接,在远程工艺控制器与工件之间建立无线通信链路。

当检测到的声学信号频率偏离允许的目标范围时(这预示可能出现产品质量下降),远程控制器可主动调整工艺参数。类似的调整有助于防止产品质量退化,例如避免产品表面出现颤振纹。换言之,基于5G的通信实现了在线质量控制系统,能够对加工过程进行实时监测,并在检测到与目标状态发生偏差时及时干预。我们将该方案与采用以太网通信的方案进行了对比分析。

步骤2: 5G网络部署目标

针对该用例,我们选定生产力、质量与可持续性作为技术目标,预计通过5G技术的应用可在上述领域产生积极影响:

- **生产力提升:**源于单位时间内合格品产量的增加。
- **质量优化:**依托在线质量控制系统实现精准质量控制,避免颤振纹等表面缺陷。
- **可持续性改进:**通过资源高效型工艺和闭环控制系统,可以显著降低生产过程中的废品率和物料损耗。

第三步:KPI估算与计算

基于选定的三大目标,我们将采用表7所列KPI及其对应方程式评估铣削加工用例。如图1所示,我们将基于估计值一共计算11项KPI。表7方程式中的各分子项和分母项,需由领域资深专家判定5G是否影响该参数,并估计影响程度。

- **生产力:**预计对吞吐率 (TR) 产生正向影响——增强的监控能力使影响生产率的工艺参数可被动态实时调整,在保证表面质量的同时提升产出;工人效率 (WE) 有望因减少流程监控时间而提高。
- **质量:**改进的质量控制系统将显著降低返工需求与废品率,故返工率 (RR) 与废品率 (SR) 将获改善。

表7: 用于评估铣削加工用例的选定目标、KPI及其方程式

技术目标	关键绩效指标	方程式
生产力	· 有效性 (E)	$E = \text{计划单项运行时间} * \frac{\text{产量}}{\text{实际生产时间}}$
	· 吞吐率 (TR)	$TR = \frac{\text{产量}}{\text{实际单位执行时间}}$
	· 工人效率 (WE)	$WE = \frac{\text{人员实际工作时间}}{\text{人员实际出勤时间}}$
质量	· 一次通过率 (FPY)	$FPY = \frac{\text{首次良好数量}}{\text{检查数量}}$
	· 质量率 (QR)	$QR = \frac{\text{合格产品数量}}{\text{产量}}$
	· 返工率 (RR)	$RR = \frac{\text{返工产品数量}}{\text{产量}}$
	· 废品率 (SR)	$SR = \frac{\text{废品数量}}{\text{产量}}$
可持续性	· 压缩空气消耗率 (ACR)	$ACR = \frac{\text{压缩空气消耗量}}{\text{产量}}$
	· 电力消耗率 (ECR)	$ECR = \frac{\text{电力消耗量}}{\text{产量}}$
	· 燃气消耗率 (GCR)	$GCR = \frac{\text{燃气消耗量}}{\text{产量}}$
	· 水消耗率 (WCR)	$WCR = \frac{\text{水消耗量}}{\text{产量}}$

Source: 5G-ACIA / ZVEI e.V.

- 可持续性:**工艺优化促使资源使用(特别是电力消耗)相关KPI呈现积极变化。

与AGV用例相同,本文所述假设仅用于演示评估模型原理,并非所有采用5G进行关键工艺参数闭环控制的铣削加工用例均可直接套用。

后续步骤需针对所选方程式中各组件进行5G影响的量化假设。

具体流程同第5.1章:铣削工艺专家需结合5G工业应用专业知识,评估5G技术优势对KPI的影响机制。将以太网方案作为基准,5G方案的预估影响汇总于表8,这些数据将用于第四步中5G技术对目标达成度的量化评估。

在评估的第四步,我们将利用表8中的数据来测算通过应用5G技术所实现的目标达成度。

表8: 铣削加工用例中5G相较于以太网的预估影响

目标	关键绩效指标	5G相较于以太网的预估影响
生产力	· 有效性 (E)	无影响
	· 吞吐率 (TR)	+ 5 %
	· 工人效率 (WE)	+ 2 %
质量	· 一次通过率 (FPY)	+ 10 %
	· 质量率 (QR)	+ 5 %
	· 反工率 (RR)	- 25 %
	· 废品率 (SR)	- 80 %
	· 压缩空气消耗率 (ACR)	- 5 %
可持续性	· 电力消耗率 (ECR)	- 5 %
	· 燃气消耗率 (GCR)	无影响
	· 水消耗率 (WCR)	- 2 %

来源: 5G-ACIA / ZVEI e. V.

第四步：目标评估

与AGV用例的评估方式类似，铣削加工用例的目标达成率也需要通过以下流程计算：首先逐项计算每个关键绩效指标(KPI)的百分比变化量，随后对每个选定技术目标下的KPI变化值求取平均值。完成计算后，可通过以下方程式对技术目标的实现程度进行量化表征：

$$\Delta \text{ 生产力} = \frac{\Delta E + \Delta TR + \Delta WE}{3}$$

$$\Delta \text{ 生产力} = \frac{0 + 0.05 + 0.2}{3} = 0.023 = 2.3\%$$

$$\Delta \text{ 质量} = \frac{\Delta FPY + \Delta QR + \Delta RR + \Delta SR}{4}$$

$$\Delta \text{ 质量} = \frac{0.1 + 0.05 + 0.25 + 0.8}{4} = 0.3 = 30\%$$

$$\Delta \text{ 可持续性} = \frac{\Delta ACR + \Delta ECR + \Delta GCR + \Delta WCR}{4}$$

$$\Delta \text{ 可持续性} = \frac{0.05 + 0.05 + 0 + 0.02}{4} = 0.03 = 3\%$$

评估结果显示：预计生产力将提升2.3%，质量指标提高30%，可持续性改善3%。

5.3 汽车生产用例

出于保密原因，本用例相关的场景描述和计算结果已经进行匿名及模糊化处理。

步骤1：应用说明

为验证商业价值计算模型，本研究选取汽车制造工厂内部物流场景中的自主代客泊车用例作为对象，该场景通过5G无线通信技术实现。本研究重点对人工泊车与自主泊车方案进行对比分析，相关商业价值计算与某汽车制造商合作完成。

人工泊车场景：车辆在生产线下线质检后，需由驾驶员接收并手动驾驶至指定停车区。为维持高生产节拍，需安排足量的驾驶员。驾驶员在完成车辆停放后需返回生产线起点，由此产生的返程空驶会形成无效工时，不仅降低流程效率，还可能因生产节拍要求导致人力需求增加。

自主代客泊车场景：自动驾驶功能通过车载系统本地处理，实现无驾驶员参与的自主泊车。每辆车配备连接5G专网的用户设备(UE)，实时接收路径规划和目标泊位信息。通过车与智能基础设施(V2X)的数据交互，协同车载传感器与外部基础设施，后端控制系统负责分配最优泊位并规划行驶路径。

接下来我们将针对人工与自主泊车方案，对比分析两种方案的关键绩效指标(KPI)与投资回报率(ROI)。

步骤2：5G部署目标选择

在此应用场景中，我们选定移动性为主要技术目标，预期通过5G实现的自主代客泊车将对此产生积极影响。同时将生产效率作为子目标进行考量：

- **移动性：**得益于自动泊车系统相较人工泊车所需停车位空间减少(有效降低场地波动性)，预计通过空间利用率(SP)和移动效率(ME)的提升实现移动性优化。此外，基于最优路径规划的自动解决方案可进一步增强系统灵活性。
- **生产力：**通过人工效率(WE)指标评估，预计因自主泊车减少人力配置可以带来效能的提升。该技术的应用还能实现工作人员负荷更均衡分配，有效消除人工泊车流程中的闲置时间。

步骤3:KPI预估与计算

基于移动性与生产力两大既定目标,将采用表9所列的关键绩效指标(KPI)及其对应计算方程式,对自主代客泊车与人工泊车方案进行对比评估。

根据图1所示的估计值,我们需完成共七项KPI的计算。针对表9中各方程式的分子项与分母项,我们通过访谈领域专家,评估了参数影响程度并量化其影响范围。

表9: 用于评估自主泊车用例的选定目标、KPI及其方程式

技术目标	关键绩效指标	方程式
移动性	• 物料处理移动性 (MHM)	$MHM = \frac{\text{系统支持路径数}}{\text{总路径数}}$
	• 准时交付 (OTD)	$OTD = \frac{\text{准时客户订单}}{\text{总客户订单}}$
	• 空间生产力 (SP)	$SP = \frac{\text{生产面积} - \text{修复面积}}{\text{生产面积}}$
	• 移动效率 (ME)	$ME = \frac{\text{系统灵活性得分}}{\text{最大灵活性 (10)}}$
生产力	• 有效性 (E)	$E = \frac{\text{产量}}{\text{计划单项运行时间} * \text{实际生产时间}}$
	• 吞吐率 (TR)	$TR = \frac{\text{产量}}{\text{实际单位执行时间}}$
	• 工人效率 (WE)	$WE = \frac{\text{员工实际工作时间}}{\text{员工实际出勤时间}}$

来源: 5G-ACIA / ZVEI e.V.

针对自主泊车用例(相较于人工泊车),现提出以下示例性假设:

- **移动性:**预计对空间生产率 (SP) 产生积极影响——因自动泊车系统实施后生产线无需预留停车区域,现有空间可重新规划以提升效率(如优化生产节拍);访谈中衍生的新指标移动效率 (ME) 通过对比方案灵活性与理想灵活度水平进行评估,自主泊车系统在该指标上预计有所提升。
- **生产力:**自主泊车流程所需人员减少,且可消除人工泊车相关的闲置时间,故预计对工人效率 (WE) 产生正向作用。

下一步将围绕5G自主泊车系统的影响提出量化假设,具体流程参照第5.1章:由内部物流领域专家评估5G技术优势对锁选定KPI的影响机制。为确保假设精确可靠,需融合专家知识与5G工业应用经验。如前所述,将基于5G的自主泊车方案与人工泊车系统进行对比,相关影响评估已汇总于表10。

表10：5G自主代客泊车与人工泊车方案影响评估对比

目标	关键绩效指标	方程式
移动性	· 物料处理移动性 (MHM)	无影响
	· 准时交付 (OTD)	无影响
	· 空间生产力 (SP)	+ 90 %
	· 移动效率 (ME)	+ 50 %
生产力	· 有效性 (E)	无影响
	· 吞吐率 (TR)	无影响
	· 工人效率 (WE)	+ 30 %

来源：5G-ACIA / ZVEI e.V.

除技术目标外，我们还通过计算经济目标来评估基于5G的自主代客泊车方案相较于人工泊车的经济效益。在此评估中，我们参照表3选取了净现值 (NPV) 作为核心衡量指标，其计算基于以下方程式：

$$\Delta \text{NPV} = \sum \frac{\text{Cash Flow} (\text{AVP} - \text{MVP})_{\text{years}}}{(1 + \text{Discount Rate})^{\text{years}}}$$

本计算通过对自主代客泊车 (AVP) 与人工代客泊车 (MVP) 在十年周期内的净现值 (NPV) 差异进行评估。现金流计算已纳入员工薪酬、设备维护及电力消耗等持续性运营成本，投资估算则包含5G系统与智能基础设施相关的一次性投入。经济效益分析结果详见表11。

此外，在净现值计算基础上同步完成了盈亏平衡点估算，对应分析图示参见图2。

表11：经济目标及结果

经济目标	结果
△净现值 (NPV) (时间 = 10 年)	+120 万欧元
投资回收周期	5年
单位产品运营支出 (OpEx) 增量 $\Delta \frac{\text{OPEX}_{\text{AVP}} - \text{OPEX}_{\text{MVP}}}{\text{Product}}$	$\frac{\text{OPEX}_{\text{AVP}} - \text{OPEX}_{\text{MVP}}}{\text{Product}} = -5.00 \text{ 欧元}$
投资回报率	+ 130 %

来源：5G-ACIA / ZVEI e.V.

本白皮书编写组郑重声明：虽然自主代客泊车用例的假设方案经由领域专家协同制定，但为保护知识产权，已经对部分参数作了调整。这些假设并非适用于所有5G自主泊车场景，其构建基于特定提供的业务数据。

表10与表11中的数据将用于第四阶段评估，以量化5G技术对预设目标的实现程度。

步骤4：目标评估

与AGV及铣削加工用例的评估方法一致，自主代客泊车用例的目标达成率需通过以下流程计算：首先逐项计算每个关键绩效指标（KPI）的百分比变化量，随后对每个选定技术目标下的KPI变化值求取平均值。

$$\Delta \text{移动性} = \frac{(\Delta \text{物料处理灵活性} + \Delta \text{准时交付率} + \Delta \text{空间生产力} + \Delta \text{移动效率})}{4}$$

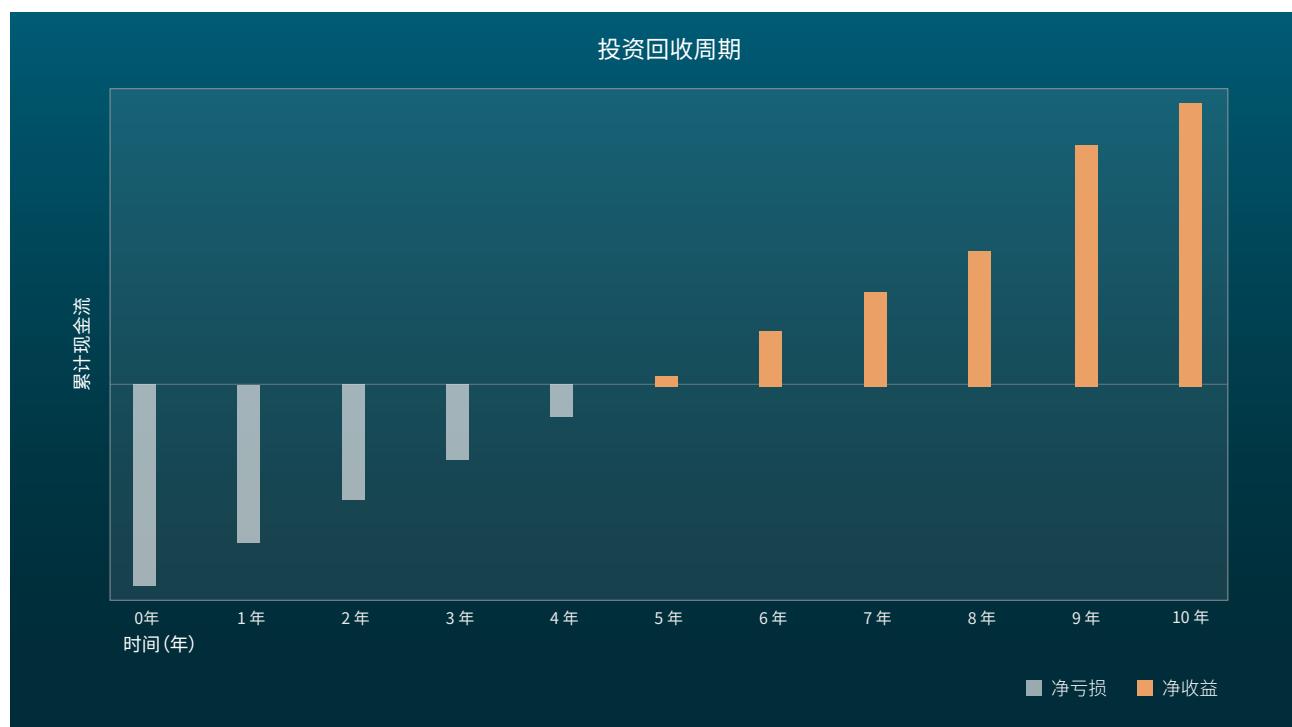
$$\Delta \text{移动性} = \frac{0 + 0 + 0.9 + 0.5}{4} = 0.35 = 35\%$$

$$\Delta \text{生产力} = \frac{(\Delta \text{有效性} + \Delta \text{吞吐率} + \Delta \text{工人效率})}{3}$$

$$\Delta \text{生产力} = \frac{0 + 0 + 0.3}{3} = 0.1 = 10\%$$

评估结果显示：预计移动性将提升35%，生产力提高10%。基于现有数据集分析，采用5G技术的自主代客泊车用例可在5年后实现投资盈利。需要说明的是，本计算已排除生产效率提升等其他因素的影响，这些因素可能进一步缩短投资回收周期。

图2：自主代客泊车与人工代客泊车的投资回收周期



来源：5G-ACIA / ZVEI e.V.

5.4 中期结论

通过对三个典型用例的详细分析，结果表明这套评估方法能够以较低成本广泛应用于各类工业5G场景。实施时可采用循序渐进的方案：初期通过电子表格定义关键绩效指标（KPI）的计算方程式，基于5G对关键工艺参数的预期影响进行初步测算；后期可迁移至软件平台（如Web工具）实现更系统的分析。

如各用例“目标评估”章节所示，我们已计算出“移动性”、“生产力”及“可持续性”等目标的提升百分比。除净现值（NPV）、投资回报率（ROI）等经济指标外，企业还可对技术改进进行财务量化——例如计算生产效率提升10%对应的经济价值，进而推算其对息税折旧摊销前利润（EBITDA）的积极影响。由于这类计算需结合企业特定财务数据，本白皮书中的示例用例未展开此项分析。

6 总结与展望

本白皮书旨在提出一套基于估算的工业5G用例商业价值评估方法。当前制造业对5G基础设施投资持谨慎态度，主因在于5G应用商业价值缺乏透明度。尽管现有研究聚焦商业价值与投资回报计算，但仍缺乏能通用评估5G用例价值主张的方法论。本白皮书所述方法可以有效填补这一空白。

为此，我们通过将方法应用于三个不同的工业5G用例来详细阐述其基本原理。借鉴所述原理并将其运用于这些案例，相关企业可通过明确技术经济目标、关联关键绩效指标（KPI）、基础计算方程式以及5G技术对这些方程式中各组成部分的预估影响，从而启动对潜在用例的自主评估。

本白皮书旨在通过这种方式推动5G技术的广泛应用，并助力工业领域数字化转型的加速进程。为具体说明该方法的应用，我们举了三个典型用例，并就5G对关键参数的潜在影响提出了相应假设。其中前两个用例基于传统制造业背景：第一个是AGV（自动导引车）用例，重点展现5G在内部物流中的应用潜力；第二个则聚焦5G技术与制造流程的直接融合，以涡轮机械部件生产的铣削加工过程为例进行说明。需要说明的是，这两个用例在技术成熟度方面仍处于原型阶段，尚未在实际生产环境中投入部署。

第三个用例——自主代客泊车——目前已在某汽车制造厂的实际生产环境中投入运营。该用例的分析表明，5G技术当前已具备对关键生产系统参数产生积极影响的潜力。

我们欢迎相关机构和团体联系5G-ACIA（5G工业与自动化联盟）办公室，以深入了解该方法论的应用，并开展旨在计算工业5G用例在生产环境中商业价值的个性化分析。

7 缩略语

5G-ACIA	5G Alliance for Connected Industries and Automation	mMTC	Massive Machine Type Communication
AGV	Automated guided vehicle	MTBF	Mean Time Between Failures
A	Availability	MTTR	Mean Time to Repair
ACR	Compressed Air Consumption Ratio	NPV	Net Present Value
AE	Allocation Efficiency	OTD	On-Time Delivery
AR	Accident Ratio	OpEx	Operational Expenditure
BLISK	Bladed Disk	QR	Quality Ratio
CapEx	Capital Expenditure	RoI	Return on Invest
E	Effectiveness	RR	Rework Ratio
ECR	Electric Power Consumption	SP	Space Productivity
FPY	First Pass Yield	SR	Scrap Ratio
GCR	Gas Consumption Ratio	SUR	Setup Ratio
IT/OT	Information Technology/ Operation Technology	TE	Technical Efficiency
KPI	Key Performance Indicator	TR	Throughput Ratio
MF	Machine Flexibility	UE	Utilization Efficiency
MHM	Material Handling Mobility	WCR	Water Consumption Ratio
		WE	Worker Efficiency

8 参考文献

- [1] Nick Kriegeskotte. (2022). 5G ist für 85 Prozent der Industrieunternehmen relevant. Bitkom e.V. Online available: <https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/5G-relevant-Industrieunternehmen>
- [2] Kiesel, R [R.], Boehm, F., Pennekamp, J., & Schmitt, R. H [R. H.] (2021). Development of a Model to Evaluate the Potential of 5G Technology for Latency-critical Applications in Production. In 2021 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM) (pp. 739–744). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEEM50564.2021.9673074>
- [3] Kiesel, R [Raphael], Henke, L., Mann, A., Renneberg, F., Stich, V., & Schmitt, R. H [Robert H.] (2022). Techno-Economic Evaluation of 5G Technology for Automated Guided Vehicles in Production. Electronics, 11(2), 192. <https://doi.org/10.3390/electronics11020192>
- [4] Kiesel, R [Raphael], Schmitt, S., König, N., Brochhaus, M., Vollmer, T., Stichling, K., Mann, A., & Schmitt, R. H [Robert H.] (2022). Techno-Economic Evaluation of 5G-NSA-NPN for Networked Control Systems. Electronics, 11(11), 1736. <https://doi.org/10.3390/electronics11111736>
- [5] Kiesel, R [Raphael], Stichling, K., Hemmers, P., Vollmer, T., & Schmitt, R. H [Robert H.] (2021). Quantification of Influence of 5G Technology Implementation on Process Performance in Production. Procedia CIRP, 104, 104–109. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.018>
- [6] ISO, 2014. 22400-1: Automation systems and integration – Key performance indicators (KPIs) for manufacturing operations management. 01.10.2014

5G-ACIA White Paper

Business Value and Return-on-Invest Calculation
for Industrial 5G Use Cases

Contact

5G-ACIA
Amelia-Mary-Earhart-Str. 12
60549 Frankfurt am Main
Germany
Phone: +49 69 6302-209
Email: info@5g-acia.org
www.5g-acia.org

Published by

ZVEI – German Electro and Digital Industry Association,
5G-ACIA – 5G Alliance for Connected Industries and
Automation, a Working Party of ZVEI
www.zvei.org

Published in June 2025

© ZVEI e.V.

This work, including all of its parts, is protected by copyright.
Any use outside the strict limits of copyright law without
the consent of the publisher is prohibited. This applies in
particular to reproduction, translation, microfilming, storage,
and processing in electronic systems. Although ZVEI has
taken the greatest possible care in preparing this document,
it accepts no liability for the content.

Design: COBRAND

9 5G-ACIA会员一览

截止2025年6月数据







5G-ACIA.org